

文章编号:1674-2974(2016)01-0076-07

大跨度楼面桁架销轴节点承载性能试验研究^{*}

丁大益^{1,3†}, 王元清², 潘斌², 石永久², 刘威³, 周均东⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 清华大学 土木工程系, 北京 100084;

3. 中国五洲工程设计集团有限公司, 北京 100053; 4. 华远建设监理公司, 山东 邹城 273500)

摘要:以山东邹城国际会展中心实际工程为研究背景, 结构为多层框架, 柱采用圆钢管或矩形钢管, 梁采用钢桁架或 H 型钢。大跨度部分二层楼面钢桁架上下弦杆及腹杆均采用 H 型钢, 与圆钢管柱采用销轴节点连接, 为较理想的铰接。因楼面荷载大, 现行规范没有销轴节点的设计方法, 有必要进行试验研究。通过 4 组试验及有限元分析, 表明销轴节点具有良好的传力性能和转动能力, 承载性能满足设计要求, 其设计方法可供类似工程参考。

关键词:销轴节点; 试验研究; 破坏机理; 承载性能

中图分类号: TU391

文献标识码: A

Experimental Study on Floor Truss Pinned Connection in Large-span Steel Structure

DING Da-yi^{1,3†}, WANG Yuan-qing², PAN Bin², SHI Yong-jiu², LIU Wei³, ZHOU Jun-dong⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei Univ of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua Univ, Beijing 100084, China; 3. China Wuzhou Engineering Design Group Limited, Beijing 100053, China;

4. Huayuan Construction Supervision Ltd, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: This paper took the project of Shandong Zoucheng International Convention Centre, a multi-story frame structure, as the research background. In this project, circular steel tubes and rectangular steel tubes were chosen for sections of columns, and steel truss and H-section steel were used for sections of beams. For instance, at the second floor, sections of the upper and underside chord members of large-span steel truss were made from H-section steel and were connected to circular steel tubes with pin joint. It could be treated as a relatively ideal hinge connection. There is heavy load on floor, and the current structural code does not include the design method of pin joint, therefore, it is necessary to conduct experimental analysis. Through four groups of experiments and finite element analysis, the result has indicated that the pin joint is equipped with good force transmission ability and rotation capacity, and it satisfies the design requirement of bearing capacity. The design method of pin joint in this paper can be used as a reference for similar projects.

Key words: pinned joints; experimental analysis; failure mechanism; bearing strength

* 收稿日期: 2014-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51038006), National Natural Science Foundation of China(51038006)

作者简介: 丁大益(1963-), 男, 安徽六安人, 教授级高级工程师

† 通讯联系人, E-mail: Dingdayi@wuzhou.com.cn

销轴连接最早应用于起重机金属结构中两个构件间的连接,以满足构件之间相对运动的需要和现场安装.例如门座起重机组组合臂架各构件之间的连接,岸边集装箱装卸桥的拉杆、小门架、桥架、门框结构和斜撑杆等各构件之间的连接都广泛采用销轴连接.

近年来,销轴节点在现代钢结构工程中得到了越来越多的推广和应用^[1].这种节点形式具有受力明确的特点,同时在建筑中又比较美观,因此在当代钢结构体系的公共建筑中经常采用.为了体现建筑的结构受力美,其受拉或受压杆件的铰接节点连接经常采用销轴连接,尤其是在柱脚和支撑当中应用较多.浦东国际机场 T2 航站楼 Y 形柱顶与钢屋架梁的连接要求柱顶在沿屋架跨度方向和垂直于跨度方向都有一定的转动能力,并能够有效传递轴力和剪力,是一种理想的万向铰接节点^[2-3].佛山岭南明珠体育馆穹顶钢结构由广东省建筑设计研究院负责设计,该结构水平环桁架与立柱的连接采用销轴节点^[4].并且国内已有学者^[5-6]对销轴节点的受力性能进行过试验研究,国外学者^[7-9]也对销轴节点的承载性能进行过理论研究.但是我国钢结构设计规范(GB50017-2003)还没有涉及该类连接节点的设计公式,设计人员通常是借鉴其他的行业规范或者国外的设计标准,常造成设计的节点存在一定的浪费或不安全因素,因此对钢结构建筑中销轴节点进行研究有较重要的意义.

本文以山东邹城国际会展中心钢结构科研课题为背景,根据设计要求和有限元分析结果,对工程中采用的楼面桁架销轴节点进行了 4 组试验,通过观察节点区域的荷载变形发展规律,找出节点的薄弱部位和节点破坏形式,以考察销轴节点的承载性能和转动性能,并提出节点构造改进措施.

1 试验背景

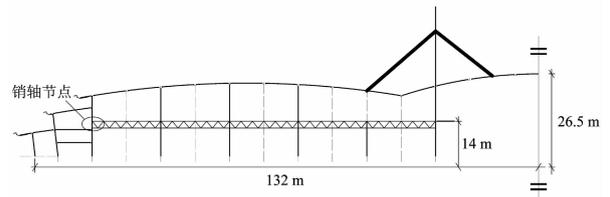
山东邹城国际会展中心项目(图 1)总占地面积 156 亩,投资 1.5 亿元,建筑面积 5.3 万 m^2 ,地上 2 层,整体建筑采用现代主流派风格,简约大气、唯美实用,功能齐全,布局合理,预计 2015 年 6 月份建成投入使用,将成为又一新的地标性建筑和对外合作交流的重要窗口.国际会展中心建筑高度为 39 m,平面尺寸 264 m \times 78 m,由主体钢结构工程和玻璃

幕墙两部分组成.主体钢结构基本为框架结构,楼面连接采用钢柱与钢桁架间的销轴节点,销轴材料为 40Cr,其余板件钢材型号为 Q345B.钢桁架上下弦杆均采用 H 型钢截面,构件通过特定构造形式的节点域与销轴节点的耳板过渡连接,截面尺寸根据节点所在位置受力不同而存在差异,由于其节点域构造复杂、焊缝交错,节点受力性能很不明确,无法用常规方法确定其承载力.

图 2 为山东邹城国际会展中心实际工程销轴连接节点照片,应用了本文的研究成果.



(a)效果图



(b)剖面图

图 1 邹城国际会展中心

Fig. 1 Zoucheng international convention centre

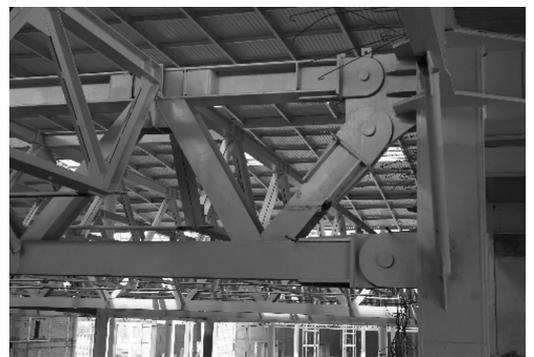


图 2 销轴节点

Fig. 2 Pinned joints

2 试验方案

2.1 试件设计

根据会展中心主体钢结构整体分析计算结果,截取桁架与钢柱连接的销轴节点进行试验研究.根据节点在最不利荷载组合下的轴力设计值,上弦轴力 $N=1\ 575\ \text{kN}$,下弦轴力 $N=1\ 015\ \text{kN}$,腹杆轴力

$N=1\ 000\text{ kN}$,在尽可能模拟销轴节点在桁架中实际受力状态的前提下,结合清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室的试验条件,对销轴节点进行1:2缩尺模型试验.缩尺模型以控制节点区域上下弦杆和腹杆轴力比值与实际结构相同为基准,模拟销轴节点的受力性能.

根据实际结构的受力状况,设计了4个节点模型试件,试件1(图3)研究销轴节点的受拉性能;试件2(图4)研究销轴节点的受压性能;试件3与试件4相同,如图5所示,试件3研究桁架节点域的静力加载性能,试件4研究桁架节点域的循环加载性能.

试件3、试件4构件截面尺寸见表1.

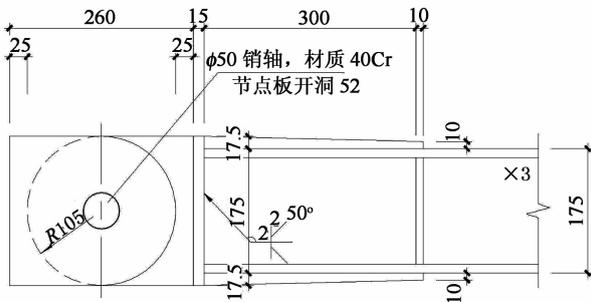


图3 试件1构造详图
Fig. 3 Details of specimen #1

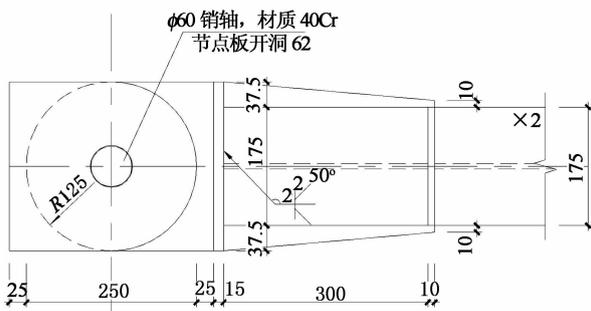


图4 试件2构造详图
Fig. 4 Details of specimen #2

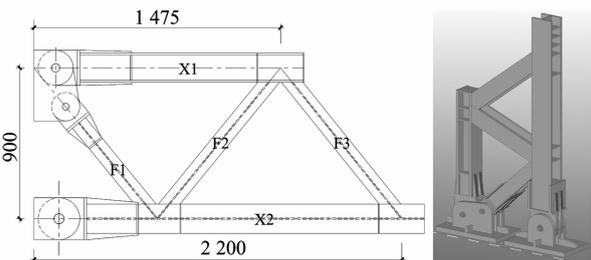


图5 试件3,4构造详图
Fig. 5 Details of specimen #3 and #4

表1 试件3,4试件构件截面尺寸
Tab. 1 Geometric dimensions of specimen #3 and #4

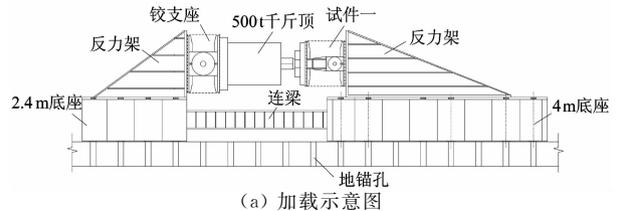
构件编号	构件名称	截面尺寸/(mm×mm×mm×mm)
X1	上弦	H175×175×20×25
X2	下弦	H175×225×16×20
F1	腹杆	H175×175×16×20
F2	腹杆	H175×175×16×20
F3	腹杆	H155×140×20×25

2.2 加载装置

试验利用实验室现有的加载反力架,应变、位移采集系统和液压千斤顶进行试件加载.

2.2.1 试件1加载装置

试件1加载示意图如图6所示.刚性底座采用地脚锚栓和丝杠压紧,避免翘起和侧移.通过连梁将两个底座连接起来,形成一个自平衡体系,抵抗液压千斤顶产生的拉力.同时设计加工了两个能够承受5 000 kN拉压力的三角反力架,其中一个与2.4 m底座顶板焊接固定,另外一个与4 m底座通过螺栓连接.为防止液压千斤顶缸体受弯,设计加工了一个能够承受5 000 kN拉压力的铰支座以保证千斤顶始终承受轴力.



(a) 加载示意图



(b) 加载过程照片

图6 试件1加载装置
Fig. 6 Test setup of specimen #1

2.2.2 试件2加载装置

试验前通过有限元分析软件对试件2的承载性能进行预估,预计将在荷载达到6 500 kN时发生破坏,因而试件1加载所用的5 000 kN千斤顶无法满足加载要求,故采用了20 000 kN重型结构多功能

空间加载装置(图 7)进行结构加载. 试件 2 一端与底座进行锚栓固定, 另一端通过压力千斤顶进行加载, 加载装置可自行提供约束反力.

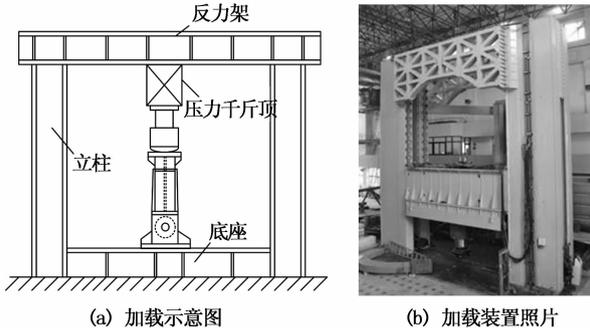


图 7 试件 2 加载装置
Fig. 7 Test setup of specimen #2

2.2.3 试件 3, 试件 4 加载装置

试件 3 和试件 4 几何构造完全相同, 试件 3 试验考察节点的静力承载性能, 试件 4 试验考察节点的循环加载性能. 因而这两个试验采用了基本相同的加载装置, 考虑到在进行循环加载过程中, 试件有可能发生侧向失稳从而导致无法完成继续加载, 所以试件 4 试验在试件 3 试验装置的基础上增加了侧向支撑以保证试件不会发生侧向失稳, 如图 8 所示.

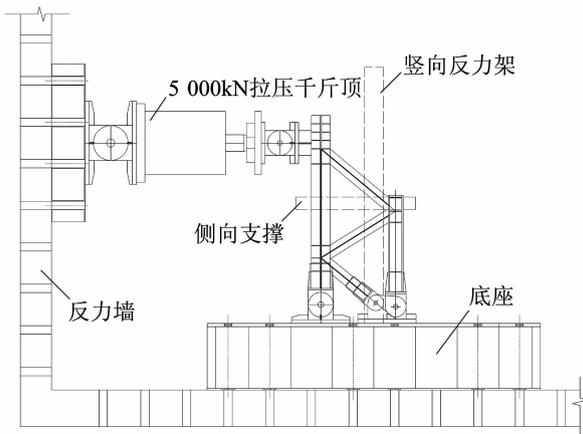


图 8 试件 3, 试件 4 加载装置
Fig. 8 Test setup of specimen #3 and #4

2.3 加载制度

前 3 个试件采用单调加载, 试件 4 采用循环加载.

2.3.1 单调加载制度

单调加载采用荷载控制方法, 分 3 阶段加载: 第 1 阶段, 初始荷载为 10% 正常使用荷载, 逐级递增, 每级荷载为 10% 正常使用荷载, 直至 100% 正常使用荷载; 第 2 阶段, 初始荷载为正常使用荷载, 逐级

递增, 每级荷载为 10% 正常使用荷载, 直至达到设计极限荷载; 第 3 阶段, 初始荷载为设计极限荷载, 逐级递增, 每级荷载为 10% 正常使用荷载, 直至节点破坏.

2.3.2 循环加载制度

根据《建筑抗震试验方法规程》JGJ 101-96^[10]的推荐, 试件拟静力实验的加载程序应采用荷载-变形双控制的方法: 即屈服前采用荷载控制, 屈服后位移控制. 但是由于本试验节点较为特殊, 销轴节点处本身就存在空隙, 循环加载过程中每次经过中位都会有一段空程, 这样对千斤顶位移加载的控制造成了很大的困难, 因而本试验加载全程都采用荷载控制, 循环加载制度如图 9 所示.

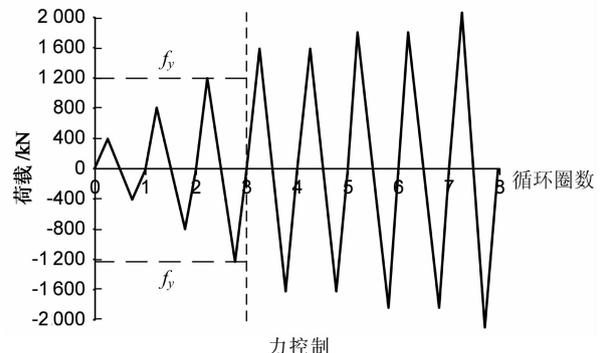


图 9 循环加载制度
Fig. 9 Cyclic loading systems

2.4 测量内容及方法

试验的量测内容包括试件的实际尺寸、钢材材性、关键部位应变、试件的变形和极限承载力等. 在需要关注的部位布置位移计, 量测试件在加载过程中的变形. 对于试件 1 和试件 2, 只需在加载两端面 4 个角部布置位移计量测试件的轴向变形; 而试件 3 和试件 4 的位移计布置较复杂, 如图 10(a)所示. 为了监测上下弦及腹杆的应力发展情况, 在杆件截面上布置了应变片. 工字形截面试件跨中和端部截面应变片的布置如图 10(b)所示, 跨中截面在翼缘边部的两侧和腹板中部的两侧分别布置应变片, 端部截面在翼缘边部的外侧布置应变片.

3 试验现象和试验结果

3.1 材性试验结果

销轴节点共采用了 3 种不同厚度的 Q345B 钢板, 分别是 10 mm, 16 mm 和 20 mm. 此外, 销轴采用了 40Cr 钢材. 因此共进行了 4 批材性试验. 在销

轴节点的加工过程中预留边角料,通过机械加工成标准材性试件,每批材性试验都有3个试件,总共12个试件.试件尺寸参考国家标准 GB/T 228—2002^[11],如图11所示.Q345B 钢材材性试件加工成板材,40Cr 材性试件加工成棒材.

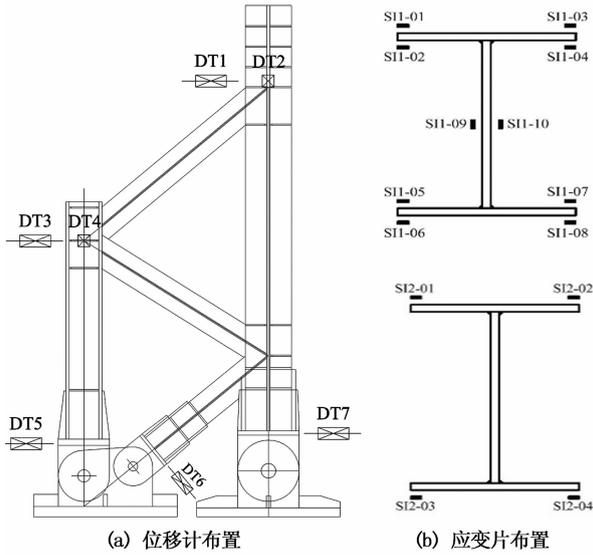


图10 量测方案
Fig. 10 Measuring schemes

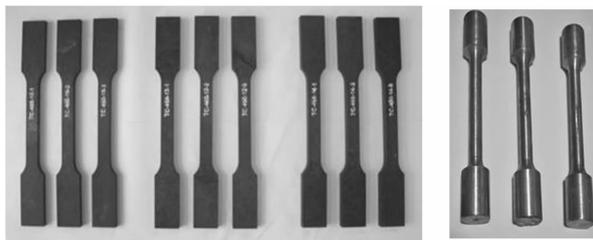


图11 材性试验试件
Fig. 11 Coupons tests

在弹性阶段,应变片的测量结果是可靠的,而当材料进入屈服以后,应变片将失效,此时引伸计的测量结果是可靠的,最后将二者的测量结果综合起来,可以测得钢材的应力-应变全曲线.在试件的中部同时布置横向和纵向的应变片,通过二者的比例关系可以计算得到材料的泊松比.根据试验机拉力与试件截面积计算得到截面应力,由应变片与引伸计测得应变,应力-应变曲线如图12所示.

3.2 试件1和试件2

试件1和试件2分别考查销轴节点的拉压性能,加载过程的荷载-变形曲线如图13所示.可以看到,两个试件加载至荷载设计值 F_d 时,荷载-位移曲线都表现为直线上升,节点仍处于弹性阶段,销轴孔

壁几乎没有变形.荷载继续增加,曲线开始出现弯折,说明节点开始进入塑性阶段,销轴孔逐渐变成椭圆形.两个试件破坏都是由于节点域焊缝断裂引起的,停止加载并观测到销轴已发生明显变形(图14).试件1荷载设计值为1400 kN,试件2荷载设计值为2000 kN.试件1和试件2的屈服荷载分别为 $1.6F_d$ 和 $1.96F_d$,破坏荷载分别为 $2.42F_d$ 和 $3.22F_d$,说明销轴节点具有较大安全储备.

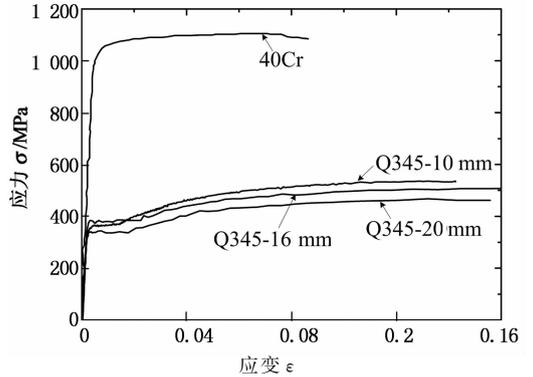


图12 材性应力-应变曲线
Fig. 12 Stress-strain curves from coupons tests

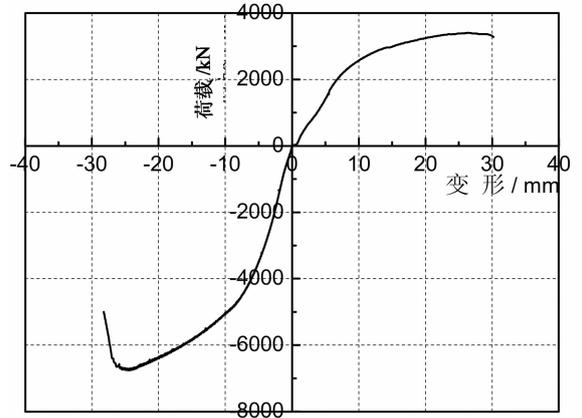


图13 试件1,试件2的荷载-变形曲线
Fig. 13 Load-deformation curves of specimen #1 and #2

销轴的变形在试验过程中无法测量,只能在试验完成后用钢尺量测,如图14所示.

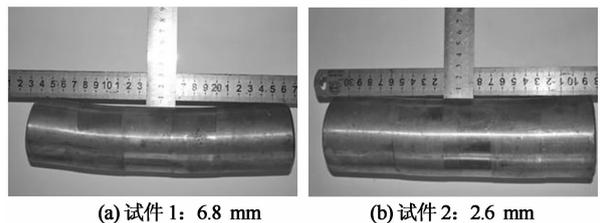


图14 试件1,试件2销轴变形测量
Fig. 14 Deformation measurement for the pin

3.3 试件 3

试件 3 考查销轴节点和楼面桁架的组合静力承载性能. 图 7 中加载点处的荷载-变形曲线如图 15 所示, 可知试件 3 承载性能满足设计要求. 试件 3 荷载设计值为 985 kN, 屈服荷载为设计值的 1.27 倍, 极限荷载为设计值的 2.34 倍. 荷载-位移曲线在加载初期能够明显看到刚度逐渐上升段, 当荷载增至一定量时才趋于稳定. 这是因为桁架端部销轴节点存在间隙, 销轴与孔壁之间有 2 mm 的余量(便于安装), 随着荷载逐渐增加, 销轴与孔壁接触量逐渐增加使得刚度逐渐增大. 试验加载过程试件侧向变形量很小且线性增长, 无侧向失稳的问题.

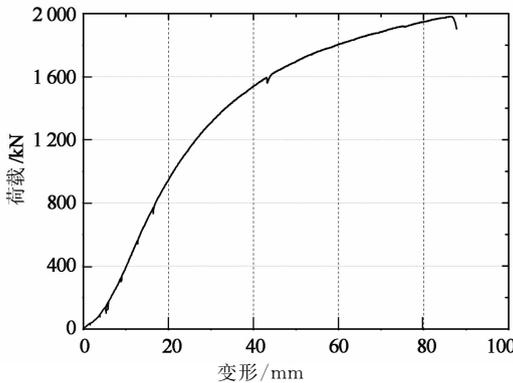


图 15 试件 3 的荷载-变形曲线

Fig. 15 Load-deformation curve of specimen #3

试件最后破坏发生在腹杆与上弦连接焊缝处(图 16), 试验结束后发现销轴变形已相当大. 观察破坏位置附近截面的应变发展, 如图 17 所示. 可见腹杆翼缘 4 个角点上的应变发展很不均匀, 杆件在加载过程中并不完全承受轴力, 还受到弯矩作用.

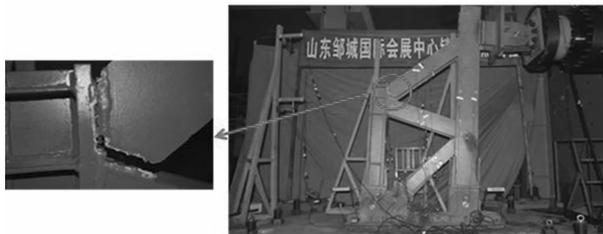


图 16 试件 3 破坏形式

Fig. 16 Failure mode of specimen #3

3.4 试件 4

试件 4 考查销轴节点和楼面桁架的组合循环加载性能. 由试件上布置测点记录的位移和应变数据分析加载中节点的承载性能. 加载点位置的荷载-变形曲线如图 18 所示.

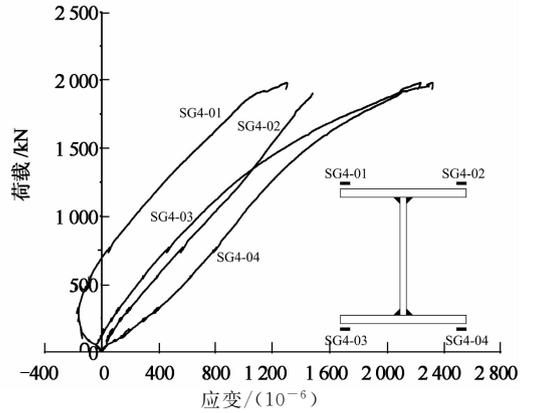


图 17 破坏位置附近截面应变发展

Fig. 17 Strain development of specimen #3

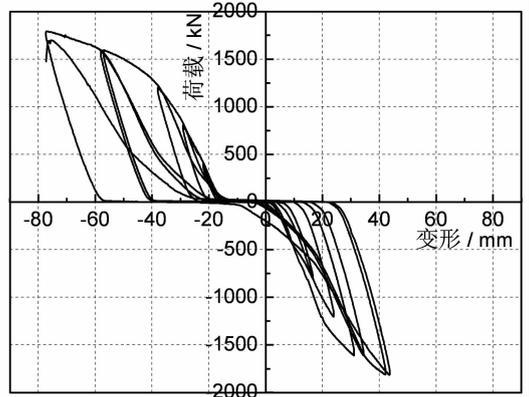


图 18 滞回曲线

Fig. 18 Hysteretic curve of specimen #4

试件 4 的破坏发生在节点焊缝处的断裂, 如图 19 所示.



图 19 试件 4 破坏形式

Fig. 19 Failure mode of specimen #4

4 结 论

对于大型复杂公共建筑,由于其结构形式复杂,设计中会遇到多种难以解决的问题,需要通过专门针对于节点等的科研分析,从而对设计提出建议.本文以邹城国际会展中心钢结构科研课题为背景,对工程中采用的楼面桁架销轴节点进行了4组试验,通过观察节点区域的荷载变形发展规律,得到以下结论:

1)销轴节点在加载过程中可以实现自由转动,能够满足设计要求.销轴连接比通常采用的高强度螺栓或焊接连接简单,易于施工安装,并较显著地节约成本.

2)销轴节点在拉压设计荷载工况下,除销轴与孔壁接触处的应力集中较大外,大部分区域应力值均小于材料的屈服强度,材料仍处于弹性状态,节点安全储备较大.最后试件破坏均发生在节点域加劲肋焊缝处,销轴也已产生较大变形.

3)销轴节点和楼面桁架的组合受力性能能够满足设计要求.静力加载情况下,设计荷载时节点仍然处于弹性工作阶段,具备继续承载的能力,极限承载力为设计值的2.34倍;循环加载情况下,节点表现出了较好的延性和耗能能力.节点破坏均是由于焊缝断裂引起的.

4)根据试验中试件破坏形式,建议在销轴节点施工过程中加强节点区的焊缝检测,并且销轴可考虑双侧固定.

参考文献

- [1] 丁大益,潘斌,王元清,等. 钢结构工程中销轴连接的应用和研究[C]//第十一届全国现代结构工程学术研讨会. 天津, 2011:680—685.
DING Da-ying, PAN Bin, WANG Yuan-qing, *et al.* Application and research of pinned connections in steel construction [C]//Proceedings of 11th National Conference on Advances in Modern Structures. Tianjin, 2011: 680—685. (In Chinese)
- [2] 汪大绥,周建,刘情云,等. 浦东国际机场T2航站楼钢屋盖设计研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(5): 45—49.
WANG Da-sui, ZHOU Jian, LIU Qing-yun, *et al.* Design and

- research on roof structure of pudong international airport terminal[J]. Building Structure, 2007, 37(5): 45—49. (In Chinese)
- [3] 陈以一,赵宪忠. 浦东国际机场T2航站楼Y形柱-梁轴承节点试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(6): 16—19.
CHEN Yi-yi, ZHAO Xian-zhong. Experimental study on radial spherical plain bearing joint connecting Y-column and beam in Shanghai Pudong international airport terminal[J]. Building Structure, 2010, 40(6): 16—19. (In Chinese)
- [4] 周敏辉,李志宏,陈文祥,等. 佛山岭南明珠体育馆穹顶钢结构设计[J]. 建筑结构, 2007, 37(9): 60—65.
ZHOU Min-hui, LI Zhi-hong, CHEN Wen-xiang, *et al.* Column arch dome steel structure design of Foshan lingnanming-zhu gymnasium[J]. Building Structure, 2007, 37(9): 60—65. (In Chinese)
- [5] 王帅,赵宪忠,陈以一,等. 向心关节轴承铰节点的试验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(增刊II): 203—208.
WANG Shuai, ZHAO Xian-zhong, CHEN Yi-yi, *et al.* Experimental study on spherical plain bearing based joint[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(SII): 203—208. (In Chinese)
- [6] 王帅,赵宪忠,陈以一. 销轴受力性能分析与设计[J]. 建筑结构, 2009, 39(6): 77—81.
WANG Shuai, ZHAO Xian-zhong, CHEN Yi-yi. Mechanical behavior and design equation for pins connected plates[J]. Building Structure, 2009, 39(6): 77—81. (In Chinese)
- [7] ACETI R, BALLIO G, CAPSONI A, *et al.* A limit analysis study to interpret the ultimate behavior of bolted joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004 (60): 1333—1351.
- [8] IYER K. Solution for contact in pinned connection[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001(38): 9133—9148.
- [9] DUERR D. Pinned connection strength and behavior[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(2): 182—194.
- [10] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ 101—96 Specifying of testing methods for earthquake resistant building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (In Chinese)
- [11] GB/T 228—2010 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京, 中国标准出版社, 2010.
GB/T 228—2010 Metallic materials tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (In Chinese)